

Новые достижения импульсной энергетики и электроники

Г. А. Месяц

Уважаемые коллеги!

Так как я выступаю перед аудиторией, в основном состоящей из студентов различных факультетов Уральского государственного университета, то я решил рассказать о той «кухне», в которой рождаются новые научные идеи, которые затем приводят к превращению фундаментальных знаний в технологии. Моей лекции можно было бы дать еще одно название – «Изумруды, найденные в мусоре». Я расскажу о двух очень интересных научных результатах, полученных в организованных мной двух институтах – Институте сильноточной электроники СО РАН и электрофизики УрО РАН. Они очень сильно повлияли на развитие новых технологий и, по существу, были обнаружены в «мусоре» от научных разработок, которые считались исчерпанными и которыми уже никто не занимался с тех пор, как они были открыты десятки лет назад. Тем самым я хотел бы показать, что даже в хорошо изученных явлениях можно найти что-то абсолютно новое, если в этом новом есть потребность, а ученый думает над этим постоянно.

О чем я хочу сказать. Существует 3 типа электрической энергии. В виде постоянного тока, синусоидального тока (типичный пример – электрическая энергия в сети с частотой 50 Гц), и третий тип – импульсная энергия – кратковременный импульс, кратковременное появление электрического тока. Наш разговор будет об импульсной энергии. В микросекундном диапазоне, например, мощные высоковольтные импульсы используются для имитации молнии. Вся моя научная карьера, начиная еще с дипломной работы, а затем исследования, сделанные в кандидатской и докторской диссертациях, и последующие связаны с изучением импульсных процессов, длительность которых составляет наносекунды (10^{-9} сек), а сейчас мы переходим к пикосекундам (10^{-12} сек). Кроме того, мощность импульсов, которые мы получаем и исследуем, огромна, она составляет тераватт (10^{12} Вт) и более. Мощность 10^{12} Вт – это масштаб мощности всех электростанций мира вместе взятых, за очень короткое время. В очень коротком импульсе развивается такая огромная мощность. Развитием такой энергетики и ее применением в физике и технологиях и занимается

основанная мной наука – сильноточная электроника и импульсная электрофизика.

Методика получения таких импульсов довольно проста. Для получения их существуют две схемы. В одной энергия накапливается в электрическом поле, а во второй – в магнитном. Первая схема содержит заряженный конденсатор, замыкающий коммутатор и нагрузку. Самая большая проблема была в том, чтобы разработать коммутатор, который выдерживал бы до миллиона вольт напряжения и замыкался за наносекунды.

Вторая возможность – это так называемая схема с индуктивным накоплением энергии, которая тоже состоит из трех основных элементов. Это – индуктивность с протекающим током в ней, размыкающий ключ и нагрузка. Вначале ключ замкнут, а затем размыкается. В индуктивности накапливается энергия, а при размыкании ключа она переходит в нагрузку. Время его размыкания также должно быть наносекундным. В этом практически и состоит вся идеология получения наносекундных импульсов большой мощности.

Потребность в них возникла в 60-х гг. XX в., когда стали создавать лазеры, источники микроволнового и рентгеновского излучения, а также развивать импульсный термоядерный синтез. Очень важное направление использования таких огромных мощностей – это возможность уйти от испытания атомного оружия. Нужны были стенды, на которых можно было бы испытывать оборудование на стойкость от воздействия электромагнитного и рентгеновского излучения большой мощности.

Мы научились получать мощные импульсы электрической энергии наносекундной длительности. В качестве замыкающего коммутатора обычно используется электрический разряд в сжатом газе, если напряжение составляло более 10 тыс. В. При меньших напряжениях можно использовать полупроводниковые приборы. Что же касается размыкающих коммутаторов, то тут проблема оказалась очень сложной, и о ней мы поговорим ниже.

Когда такие результаты были получены, возникла идея перевести эту энергию в энергию электронных пучков и создать новые ускорители. Вы знаете, что существует много типов ускорителей. Есть ускорители, имеющие колоссальную энергию единичных электронов (сотни гигаэлектрон-вольт), но при этом очень маленький ток (несколько микроампер и даже наноампер). Ускорители, которые разрабатывали мы, имели небольшие энергии (мегаэлектрон-вольты), и ток в электронных пучках достигал миллиона ампер.

Каким образом нам удалось такой большой ток электронов «вытащить» из катода? Вы знаете, что существует термоэлектронная эмиссия. Все, что есть на экране телевизора, создает электронный пучок, полученный за счет такой эмиссии из катода. Фотоэлектронная эмиссия – это когда квант света определенной длины волны падает на катод и выбивает электроны. Автоэлектронная эмиссия – это извлечение электронов под действием очень высокого электрического поля. Плотность тока электронов при автоэлектронной эмиссии очень сильно возрастает с ростом величины электрического поля на поверхности катода.

Термоэлектронная эмиссия не позволяет получать большие токи – в лучшем случае мы сможем получить ток в сотни ампер. При фотоэлектронной эмиссии плотность тока ничтожна. Для получения огромных токов в миллионы ампер, о которых мы говорили выше, требуется большая плотность тока. Автоэлектронная эмиссия позволяет получать большие плотности тока. При электрическом поле 10^8 В/см в принципе можно получить плотность тока более 10^8 А/см². Но из-за колоссальной зависимости напряженности поля от плотности тока автоэлектронную эмиссию использовать очень трудно. Она очень неустойчива. Даже при малом изменении напряженности поля катод (а в качестве катода использовалось тонкое острие) взрывается.

Вы знаете, что до появления полупроводниковых приборов вся радиотехника основывалась на электронных лампах, таких как диоды, триоды, тетроды и т. д., и т. д. Самая большая проблема, существовавшая в работе этих ламп, – это нагретый катод. Необходимо было иметь маленькую печку, чтобы подогревать катод. Это делало установки очень громоздкими. Например, первые компьютеры на электронных лампах размещались в таких больших залах, как эта аудитория. Ученые начали искать способы, как уйти от термоэлектронной эмиссии, для этого стали подробнее изучать автоэлектронную эмиссию. Этим занимались многие исследовательские коллективы и у нас в стране, и за рубежом. К 60-м гг. прошлого века все исследователи пришли к единому выводу: автоэлектронная эмиссия – это тупиковое направление, ничего из этого не получается. Почему?

В радиотехнике в основном использовали импульсы длительностью в милли- и микросекунды. Как только ток превышал некоторую плотность, кончик катода сильно нагревался и расплавлялся. Поэтому автоэлектронная эмиссия исчезала. Исследовательская группа американского ученого У. Дайка (в честь которого учреждена очень престижная международная премия за исследования в области вакуумной

электроники и вакуумного разряда) пришла к выводу, что автоэлектронная эмиссия при этом переходит в электрическую дугу. Исследования в этой области были прекращены как бесперспективные. Но оказалось, что сам процесс от того момента, когда автоэлектронная эмиссия еще существует, и до того момента, как появляется дуга, – это целый мир абсолютно новых явлений. В это короткое время можно получать ток электронов до миллиона ампер. В чем дело?

Оказывается, когда происходит перегрев катода, имеет место не оплавление, а, вследствие гигантских плотностей тока (10^8 – 10^9 А/см²), взрыв металла. Этот взрыв мы смогли зарегистрировать фотографированием с экспозицией порядка наносекунды. Как было нами показано, при взрыве образуется плазма, движущаяся с катода на анод со скоростью 10^6 см/с. Из этой плазмы идет очень большой ток. Если, например, ток до взрыва был порядка 1 А, то после взрыва получается ток в 100 А с одного острия. Используя 10000 острий, можно получить ток 10^6 А. Я назвал это явление взрывной электронной эмиссией (ВЭЭ).

Использование импульсной энергетики и явления ВЭЭ позволило нам создать сильноточную электронику, разработать совершенно новый класс ускорителей. Первый наш ускоритель был создан в 1967 г. в Томском политехническом институте. Затем эта техника стала быстро развиваться. В дальнейшем мы научились преобразовывать энергию электронных пучков в энергию электромагнитного и лазерного излучения. Удалось увеличить мощность СВЧ-приборов и лазеров в тысячи раз.

Вот это первый крупный научный результат, найденный буквально в «мусоре», в «отходах научного производства», так как все исследователи считали, что эта проблема давным-давно закрыта.

Второе интересное открытие, которое было нами сделано, состоит в том, что нам удалось разработать новый тип полупроводникового отключающего коммутатора. Это позволило получить большую частоту следования мощных наносекундных импульсов. До начала наших исследований самое большее, что мы могли получить, это 100 импульсов в секунду (100 Гц). Электронные пучки на базе ВЭЭ при большой частоте импульсов можно было бы использовать для многих технологических приложений, например для очистки воды, стерилизации продуктов и медицинских инструментов, для очистки воздуха от отходов тепло- и электростанций и т. д. Приборы, использующиеся для этих целей, сейчас работают при постоянном напряжении и поэтому имеют большие размеры. Чтобы создать технологии с использованием

электронных пучков на базе ВЭЭ, нам потребовалось получать пучки с большой частотой следования импульсов. Чтобы постоянный ток преобразовывать в импульсный в системах с индуктивным накоплением энергии, надо было научиться быстро прерывать протекание тока. Об этом мы говорили выше. Десятки лет и мы, и многие американские исследователи искали эффективные способы быстрого обрыва тока. Были испробованы такие методы, как взрыв проводников, неустойчивость тока в плазме, инжекция электронов в газ, разряд в газе низкого давления и т. д., но получить при этом большое число импульсов за секунду не удавалось. Мы нашли совершенно нетривиальное решение этой проблемы, используя обычные полупроводниковые выпрямители. Вы знаете, что для того, чтобы синусоидальный ток преобразовать в постоянный, используют выпрямители тока полупроводникового типа.

Полупроводниковые выпрямители хорошо работают в электротехнике. В разных странах, включая Россию, создана огромная промышленность для производства таких приборов. Но существует дефект, мешающий работе полупроводниковых выпрямителей. Иногда выпрямление тока происходит не до конца. Часть тока продолжает течь в другом направлении, а затем быстро обрываться. Это приводит к перенапряжению в сети и, как следствие, к выходу электрических приборов из строя. По-английски это называется «рекавери эффект». Американцы впервые избавились от этого недостатка выпрямителей. Они создали приборы, которые выпрямляют ток без этих помех. Это – прекрасные выпрямители тока. Наша страна отстала в разработке хороших полупроводниковых выпрямителей. Мы взяли наши плохие диоды с сильным «рекавери эффектом». Пропустили синусоидальный ток с микросекундным периодом (вместо миллисекундного в обычной энергетике) при плотности тока 10^4 А/см² и добились обрыва тока в максимуме обратной полуволны тока. При этом оказалось, что время обрыва тока равно наносекунде, частота следования импульсов 10^4 Гц, напряжение до миллиона вольт, а средняя мощность может достигать сотни киловатт. Я специально в Америке пошел в магазин электротехники и купил все имеющиеся выпрямительные диоды. Привезли в наш Институт и показали, что чем хуже выпрямительный диод, тем лучше его качество обрыва тока. Мы назвали это СОС-эффектом («семикондактор опенинг свитч»). Была создана теория этого эффекта, а затем разработаны уже специальные диоды с нашим «ноу-хау». Мы выпускаем приборы с такими характеристиками. Сейчас в Институте электрофизики в Екатеринбурге мы

разрабатываем генераторы наносекундных импульсов большой мощности с использованием этих полупроводников.

Созданы импульсные приборы на базе СОС-эффекта для электронных пучков, источников плазмы, рентгеновского излучения, лазеров и источников СВЧ-излучения большой мощности. Для медицины разработаны рентгеновские аппараты, которые уже используются в нескольких клиниках Москвы.

В 1976 г. явление взрывной электронной эмиссии было признано открытием с приоритетом от 1966 г. Это открытие положило начало новым направлениям в науке – сильноточной эмиссионной электронике и импульсной электронике большой мощности. За работы по исследованию взрывной эмиссии электронов и созданный на их основе новый класс рентгеновских аппаратов я был удостоен в 1978 г. Государственной премии СССР и Международной премии У. Дайка. Работа, связанная с СОС-эффектом, также была удостоена Государственной премии Российской Федерации 2002 г.

Оба эти открытия – и взрывная электронная эмиссия, и СОС-эффект, найденные среди, казалось бы, уже полностью изученных физических явлений, в так называемом «научном мусоре», оказали колоссальное влияние на развитие новых технологий в мире. Нам по праву принадлежит приоритет в этой области, а наша страна занимает ведущие позиции в мире в области энергетики и электроники больших мощностей.

Приглашаю вас, дорогие друзья, в мир физики. Там еще очень много неисследованного, таинственного и загадочного, даже в отвалах научных разработок.